



Параметры маскировки объектов аэрозолями и способ их установления

А.А. Брусенин✉, В.Н. Пенязь, Д.Н. Буряк, И.В. Артамонов, Д.С. Горбачев

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации,
111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19
✉ e-mail: 27nc_1@mail.ru

Основные моменты

- Новые параметры маскировки должны учитывать вероятность скрывания пространства и вероятность искажения наблюдаемой картины прозрачным аэрозолем за счет изменения первоначального направления квантов света прозрачными частицами.

- Для проверки теоретических положений предложена экспериментальная установка измерения прямых и измененных квантов света с последующей математической обработкой результатов.

Актуальность. Маскировка объектов аэрозолями для противодействия средствам разведки и управления оружием противника сохраняет актуальность, что подтверждается опытом выполнения задач в специальной военной операции (СВО).

Цель работы – установление параметров маскировки объектов аэрозолями, обусловленного влиянием частиц аэрозоля на распространение в пространстве видимого спектра света (электромагнитного излучения – ЭМИ), несущего информацию о маскируемом объекте и фоне.

Источниковая база исследования. Предыдущие статьи авторов по маскировке объектов аэрозолями, опубликованные в «Вестнике войск РХБ защиты» (2021–2024 гг.).

Метод исследования. Системный анализ прежних подходов теории маскировки объектов аэрозолями с использованием классических взглядов на взаимодействие квантов света при их прохождении сквозь прозрачную и непрозрачную среду (совокупность частиц аэрозоля).

Результаты. Выявлены недостатки прежних подходов теории маскировки, не учитывающих дисперсность аэрозоля (их размер) и разницу взаимодействия света с прозрачным и непрозрачным аэрозолем.

Заключение. Основные параметры для маскировки объектов с помощью аэрозолей должны включать: коэффициент пространственного затенения (доля пространства, перекрываемого аэрозольными частицами от наблюдателя или оптического прибора), коэффициент искажения траектории фотонов (доля квантов света, которые после взаимодействия с прозрачными частицами отклоняются от своей первоначальной траектории и проецируются на неверные точки наблюдаемого объекта или фона). Общая вероятность маскировки определяется как сумма этих независимых вероятностных событий. Для экспериментального определения вероятностей маскировки и искажения с использованием прозрачных аэрозолей предлагается установка, включающая: стандартную аэрозольную камеру и две дифракционные решетки: первая решетка создает первичный источник плоскополяризованного света, вторая решетка выполняет функцию приемника с противоположащими подвижными секторами, предназначенного для измерения интенсивности света в дискретных угловых интервалах при полном повороте измерительного устройства на 360°. Разработана специальная математическая модель для обработки экспериментальных данных и расчета параметров маскировки.

Ключевые слова: вероятность маскировки; вероятность скрывания и искажения объекта и фона маскирующим аэрозолем; закон Малюса; маскировка аэрозолями; поляризация света; прямые и искаженные лучи видимого спектра ЭМИ

Для цитирования: Брусенин А.А., Пенязь В.Н., Буряк Д.Н., Артамонов И.В., Горбачев Д.С. Параметры маскировки объектов аэрозолями и способ их установления. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):228–239. EDN:vhpeqo.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-228-239>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

© А.А. Брусенин, Д.Н. Буряк, В.Н. Пенязь, И.В. Артамонов, Д.С. Горбачев, 2025

Конфликт интересов: нет.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации (27 НЦ МО РФ).

Поступила 13.05.2025 г. После доработки 25.05.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Parameters for masking objects with aerosols and the method of their establishment

Albert A. Brusenin[✉], Vladimir N. Penjaz', Dmitry N. Buryak, Ilya V. Artamonov, Dmitry S. Gorbachev

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky
of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Highlights

- The new camouflage parameters must account for the probability of concealing space and the probability of distorting the observed image by a transparent aerosol due to the change in the initial direction of light quanta by transparent particles.

- To verify the theoretical propositions, an experimental setup has been proposed to measure direct and altered light quanta, followed by mathematical processing of the results.

Relevance. The use of aerosol obscurants for camouflaging objects against enemy reconnaissance and weapon guidance systems remains a critical task, as evidenced by operational experience in the Special Military Operation (SMO).

Purpose of the study is to determine aerosol masking parameters. They are stipulated by the impact of aerosol particles on visible light range distribution in space (electromagnetic impulse), which contains data on objects to be masked and their background.

Study base sources. Previous articles of these authors on aerosol masking that were published in the Journal of NBC Protection Corps in 2021–2024.

Method. The authors of this article have conducted a comprehensive analysis of the previous approaches to the object aerosol masking and analyzed the traditional opinions about the light quanta interaction when they go through transparent and non-transparent media (aerosol particle assembly).

Results. The authors have identified the shortcomings of the previous approaches to the object aerosol masking, which neglected the aerosol size distribution and the difference in light interactions between transparent and non-transparent aerosols.

Conclusions. The primary parameters for aerosol-based object concealment should include: the spatial obscuration ratio (fraction of space occluded by aerosol particles from an observer or optical device), the photon path distortion ratio (portion of light quanta that, after interacting with transparent particles, deviate from their original trajectory and project onto incorrect points of the observed object or background). The total camouflage probability is defined as the sum of these independent probabilistic events. For experimental determination of concealment and distortion probabilities using transparent aerosols, we propose a setup comprising: a standard aerosol chamber and two diffraction gratings: the first grating generates an initial source of plane-polarized light, the second grating functions as a receiver with opposing movable sectors, designed to measure light intensity at discrete angular intervals during a complete 360° rotation of the measurement device. A dedicated mathematical framework has been developed to process the experimental data and calculate the camouflage parameters.

Keywords: aerosol masking; camouflage probability; direct and distorted rays of electromagnetic impulse visible range; light polarization; Malus Law; probability for concealment and distortion of objects and background by a masking aerosol

For citation: Brusenin A.A., Penjaz' V.N., Buryak D.N., Artamonov I.V., Gorbachev D.S. Parameters for masking objects with aerosols and the method of their establishment. *Journal of NBC Protection Corps.* 2025;9(3):228–239. EDN:vhpeqo.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-228-239>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no conflict of interest.

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: 27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation (27 SC MD RF)

Received May 13, 2025. Revised May 25, 2025. Accepted September 27, 2025.

В настоящее время наиболее известным основным подходом при оценке эффективности маскировки является учет влияния яркости облака аэрозоля на сравнительный контраст между фоном и объектом.

При этом имеются расхождения в математических зависимостях учета яркости, например, в источнике [1] и в описании к патенту [2].

В источнике [1, стр. 44] контраст яркости, определяющий распознавание объекта на фоне без наличия аэрозоля, представлен в виде:

$$K = |(B_{\phi} - B_{об})| / B_{\phi} \leq (0,01 - 0,02). \quad (1)$$

При этом авторы выдвигают гипотезу о снижении контрастности при маскировке аэрозолями за счет прибавки значения яркости аэрозольного облака (B_a) к знаменателю зависимости (1):

$$K = |(B_{\phi} - B_{об})| / (B_{\phi} + B_a), \quad (2)$$

где: переменные B_{ϕ} , $B_{об}$, B_a соответствуют яркости фона, объекта и облака аэрозоля, Вт/(м²×ср).

В отличие от этого в патенте [2] данная зависимость трансформирована в следующем виде:

$$K = |(B_{\phi} - B_{об})| / (B_{\phi} + B_{об} + 2 \times B_a). \quad (3)$$

Одновременное суммирование в знаменателе яркостей объекта, фона и двойной яркости аэрозоля, по нашему мнению, не оправдано, поскольку при наблюдении объекта и фона линии визирования разные: фон с аэрозолями или объект с аэрозолями. В числителе зависимости (2) яркость аэрозоля отсутствует из-за их взаимного вычитания. А в знаменателе – она прибавляется однократно.

Можно отметить, что при внешней правильности зависимостей (1) и (2) возникает вопрос по поводу выбора единиц измерения яркости. Наличие «м²», по нашему мнению, неоправданно. Если фоном является небо, то непонятно: какую «глубину неба» авторы выбрали, поскольку свечение неба обусловлено атмосферой – «рыхлой» структурой? От выбранной глубины зависит площадь «среза неба», которая прямо пропорциональна квадрату этой величины в пределах телесного угла измерения. При сравнении яркостей объекта с фоном нет необходимости в использовании соответствующих величины площади объекта и фона, достаточно энергию разделить на телесный угол их наблюдения, предпочтительно по меньшему значению. О размерности яркости, как энергии, деленной на телесный угол, указывают и авторы [1, стр. 41]: «Однако во всех случаях яркость светящегося тела ABD остается неизменной и будет равна энергии, попавшей в точку F (F – точка измерения яркости) и деленной на телесный угол».

Самое главное замечание относительно влияния яркости облака на маскировку объекта (при обнаружении и идентификации) заключается в том, что предложенные зависимости (2), (3) не учитывают действие черных (непрозрачных и не «священных») аэрозолей. Дело в том, что с повышением интегральной концентрации аэрозоля по линии визирования (или плотности потока, г/м²), облако непрозрачного аэрозоля (черного дыма) по своим свойствам приближается к абсолютно черному телу относительно видимого спектра электромагнитного излучения с минимизацией яркости. По зависимостям (2), (3) при снижении яркости аэрозольного облака заметность объекта повышается, но практика применения черных дымов это опровергает. В этой связи можно привести

зримый пример для любого наблюдателя: при значительной облачности отдельные участки облаков светлые, другие более темные. При этом можно слышать звук самолета за облаками, который становится видимым только в промежутке между ними. Исходя из теории яркости, темные участки облачности должны маскировать хуже. Но в реальности этого нет.

Выполненное нами моделирование показало, что при снижении размеров частиц аэрозоля вдвое, при равных концентрациях и длине линии визирования, вероятность скрытия возрастает почти в два раза [3]. Таким образом, не учет диаметра частиц является значимым недостатком прежней теории маскировки. Эквивалентность полученной нами в ходе исследований теоретической и практической зависимости Ламберта-Бера подтверждает объективность выбранного авторами данной статьи теоретического моделирования маскировки в части оценки доли скрытия пространства аэрозолями [4].

Цель работы – установление параметров маскировки объектов аэрозолями, обусловленного влиянием частиц аэрозоля на распространение в пространстве видимого спектра света (электромагнитного излучения – ЭМИ), несущего информацию о маскируемом объекте и фоне.

Источниковая база исследования. Предыдущие статьи авторов по маскировке объектов аэрозолями, опубликованные в «Вестнике войск РХБ защиты» (2021–2024 г.).

Метод исследования. Системный анализ прежних подходов теории маскировки объектов аэрозолями с использованием классических взглядов на взаимодействие квантов света при их прохождении сквозь прозрачную и непрозрачную среду (совокупность частиц аэрозоля).

Предлагаемый авторами статьи новый подход к оценке маскирующих параметров аэрозоля базируется на следующих положениях. Для маскировки объектов в настоящее время используются составы, формирующие прозрачные (воспринимаемые зрением как белые вследствие смещения ЭМИ различных длин волн или цветности) и черные дымы. Их действие различается:

черные дымы поглощают все кванты света, попавшие на частицы аэрозоля. Отсюда следует, что маскировка объекта этими дымами может характеризоваться долей скрытия (экранирования) пространства между наблюдателем и объектом с фоном частицами дыма. Кванты света, не задевшие аэрозоль, несут в себе изображение объекта за вычетом закрытой доли пространства. Способ расчета этой доли приведен в статье [4]. Необходимо

разделить кванты, свободно прошедшие через аэрозольное облако и встретившие частицы аэрозоля:

не задевшие аэрозоль кванты, и дошедшие беспрепятственно по прямой до глаз наблюдателя или окуляра оптического прибора, могут характеризоваться величиной прямого света – $I_{\text{пр}}$. Если из начального общего потока света (I_0) до аэрозольного облака (АО) вычесть прямой свет ($I_{\text{пр}}$) и разделить последнее на I_0 , то полученное частное будет соответствовать доле квантов, задевших аэрозольные частицы, что соответствует скрытию объекта. Черным аэрозолями все эти кванты поглощаются. Эта величина названа нами вероятностью скрытия объекта (P_c), поскольку имеет статистический характер [3]:

$$P_c = (I_0 - I_{\text{пр}}) / I_0. \quad (4)$$

Вероятность скрытия (доля квантов, встретивших аэрозоль) теоретически совпадает для черного и прозрачного аэрозоля при равных условиях (дисперсности и плотности потока). Эта же доля квантов, встретивших прозрачный аэрозоль, после многократного отражения от частиц аэрозоля и преломления при прохождении через них, разделяется на две части. Первая часть квантов, подвергнутая рассеиванию и отражению частицами АО, теряется в пространстве в стороны и назад. Вторая часть этих же квантов попадает в глаз наблюдателя (окуляр оптического прибора), но в связи с изменением своего первоначального направления, проецируются наблюдателем на другие участки фона или объекта, что приводит к искажению наблюдаемой области фона и объекта. Доля квантов света ($I_{\text{и}}$) от общего светового потока (I_0), прошедшая через прозрачный аэрозоль, и искажающих объект и фон, также имеет статистический смысл и названа нами вероятностью искажения ($P_{\text{и}}$):

$$P_{\text{и}} = I_{\text{и}} / I_0. \quad (5)$$

Отметим, что теоретическая доля квантов, искажающая объект ($P_{\text{и}}$), не может быть выше скрытия (P_c), так как доля этих квантов арифметически состоит из встретивших аэрозоль, за вычетом тех, которые из этого облака рассеиваются в пространстве. Таким образом, прозрачный аэрозоль к вероятности скрытия объекта черным аэрозолями (при прочих равных условиях) добавляет вероятность его искажения, что в целом повышает вероятность маскировки объекта прозрачным аэрозолями по сравнению с черным. Следует подчеркнуть, что носителем визуальной

информации об объекте или фоне являются не отдельные кванты света, а их агломераты, называемые пикселями, которые должны иметь угловой размер, достаточный для восприятия глазом человека [5]. Но в данной статье эффект нераспознавания из-за малого телесного угла видимых пикселей информации – не рассматривается, основной акцент уделяется эффектам скрытия и искажения объекта и фона прозрачным аэрозолем. Для формализации процесса маскировки аэрозолями, допустимо употреблять термин квант (или единичный световой луч), являющийся минимальной составляющей видимого света, взаимодействующего с аэрозолем, подразумевая, что совокупность этих квантов формирует световые потоки, о свойствах которых идет речь.

Предлагаемый нами аналитический вид зависимости расчета вероятности маскировки от вероятностей скрытия (P_c) и искажения ($P_{и}$) как суммы независимых случайных событий, представлен в виде:

$$P_m = P_c + P_{и} - (P_c \times P_{и}). \quad (6)$$

Исходя из приведенной зависимости, факт одинаковой маскировки самолета темными и светлыми участками облачности легко объясним. При высокой плотности аэрозоля прямых лучей, несущих информацию о картине за облаками, практически нет, то есть P_c предельно близко к 1. Яркость облачности определяется долей рассеянных в пространстве лучей света, часть из которых попадают в наши глаза. При этом, чем выше плотность аэрозоля, тем меньшая доля искаженных лучей «прорывается» к нам сквозь облачность, из-за потерь в пространстве, что соответствует темным его участкам. Математически это выражается следующим образом: и светлые и темные участки не пропускают прямые лучи, то есть P_c практически равно 1, при этом светлые участки пропускают для наблюдения большую долю начального рассеянного (искаженного по нашей терминологии) светового потока ($P_{и}$), например, 0,4, а темные – 0,1. Исходя из зависимости (6) эффект вероятности маскировки самолета облачностью для наземного наблюдателя для предложенных вариантов равен:

$$P_m = 1 + 0,4 - (1 \times 0,4) = 1, \quad (7)$$

$$P_m = 1 + 0,1 - (1 \times 0,1) = 1. \quad (8)$$

В качестве математической шутки: уравнение (6) работает и для ночных условий как некоторого эквивалента непрозрачного (абсолютно черного) аэрозоля с очень высокой

плотностью потока, когда прямых лучей нет, а доля искаженных равна нулю:

$$P_m = 1 + 0 - (1 \times 0) = 1. \quad (9)$$

Данный пример показывает, что при предлагаемом теоретическом подходе к маскировке, изменение яркости облака аэрозоля может и не оказывать влияния на ее качество, в противоположность теории яркости. Подчеркнем, что уравнения (2) и (3), оперирующие яркостью, для примеров с облачностью и действием «черного» аэрозоля теряют логический смысл, то есть вырождаются. Таким образом, яркость аэрозольного облака является косвенным показателем качества маскировки, а не определяющим.

Способ экспериментальной оценки маскировки измерением ослабления света, предложенный Г. Лучинским и Ю. Вейцером в 1947 г., практически сохранился до сих пор, рисунок 1. Главные составляющие установки: аэрозольная камера (АК), источник света, наблюдаемый объект и регистратор характеристик изменяемого аэрозолем света повторяется и у авторов патента [2]. Принципиальные отличия, по нашему мнению, заключаются в том, что измеряется и как, а также – какие исходные параметры учитываются при этих измерениях. Можно отметить, что за почти вековое существование теории яркости, экспериментальное влияние ее на маскировку никем не показано. И это не случайно, величина контрастности уравнений (1), (2) за счет внешней освещенности возрастающей (уменьшаемой) в N раз не меняется.

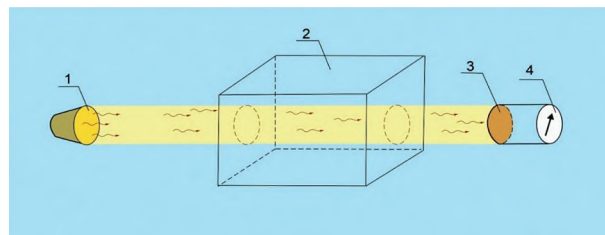


Рисунок 1 – Схема установки для экспериментального установления/ослабления потока света аэрозольной камерой (рисунок авторов): 1 – источник обычного света; 2 – аэрозольная камера; 3 – приемник света с фотоэлементом; 4 – микроамперметр для измерения потока света

Figure 1: Layout of facility that is aimed at experimental generating/diminishing of a light flow by an aerosol chamber (the figure is compiled by the authors of this paper): 1, a normal light source; 2, an aerosol chamber; 3, a light receiver with a photo cell; 4, a microammeter for light flow measurements

Поскольку все члены этих зависимостей, а именно – яркость фона, объекта и аэрозольного облака (не обладающего собственным излучением в абсолютной темноте) изменяются во столько же раз, то есть величина контрастности сохраняется, что отражает и уравнение Ламберта-Бера относительно доли пропускаемого света [4]. Другое дело, что при значительном снижении освещенности, например, вечером, распознавание объектов и без аэрозоля снижается, но это качество зрительного восприятия, а не влияние маскировки.

Для доказательства давнего существования иных подходов на маскировку аэрозолями с позиции срытия пространства и искажения световых лучей уместно привести цитату из источника [7, стр. 304], где проводится анализ результатов работы Ватсона и Киблера (Эджвудский арсенал), которые определяли «затемнение» аэрозолем маскируемой площади с учетом суммарной поперечной площади частиц (аналогично нашему подходу в статье [3]). Вывод авторов теории яркости категоричен: «Несмотря на свою заманчивость и, казалось бы, относительно хорошее совпадение эксперимента с теорией, предложения Киблера и Ватсона, несомненно, порочны». Также решительно отвергались и взгляды отечественных оппонентов теории яркости: «Часто приходится встречаться с представлением о том, что маскирующее действие дымов и туманов заключается в задержке или изменении направления прямых лучей от предмета к наблюдателю». Исходя из приведенных нами аргументов можно констатировать, что ранее высказанные, и правильные, по-нашему мнению, взгляды на маскировку аэрозолями были незаслуженно преданы забвению на официальном уровне почти на столетие.

Исходя из представленной нами логики формирования величин скрытия и искажения объекта и фона, определяющих маскировку (4)–(6) при прохождении света через аэрозольное облако (АО), можно выполнить графическое отображение этих функций на рисунке 2.

Таким образом, в соответствии с предлагаемым нами подходом оценки маскировки, основой ее является скрытие объекта и фона, которая эквивалентна для прозрачного и черного аэрозоля, но для прозрачного дополняется искажением, которое визуально сопровождается свечением, поскольку прозрачный аэрозоль, пропуская сквозь себя световые

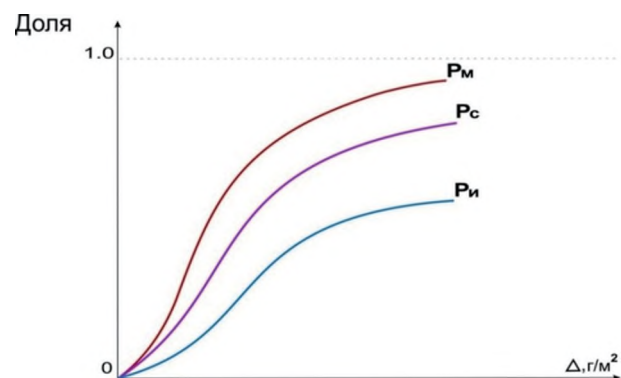


Рисунок 2 – Изменение вероятности скрытия (P_c), искажения (P_d) и суммарной вероятности маскировки (P_m) прозрачным аэрозолем от плотности потока аэрозоля, г/м^2 (рисунок авторов)

Figure 2: The dependence of probability for concealment (P_c), distortion (P_d) and total masking probability from aerosol flow density (P_m), g/m^2 , when we speak about transparent aerosol masking (the figure is compiled by the authors of this paper)

лучи, часть из них одновременно рассеивает во все стороны.

Любая теория нуждается в необходимости ее практического подтверждения. В этой связи предлагается экспериментальный метод определения долей прямых и искаженных квантов, не задевших частицы аэрозоля, а также отраженных и преломленных при взаимодействии с частицами. Для этого необходимо использовать свойство поляризованного света: сохраняющего направление электрической и магнитной составляющих при свободном прохождении в пространстве, и изменяющего плоскость поляризации при встрече с прозрачными частицами аэрозоля¹ [8]. Наиболее простой способ получения поляризованного света – использование дифракционного решетки.

Поляризованный свет позволяет прогнозировать или определить изменение направления кванта, в зависимости от угла падения на сферическую частицу аэрозоля по отношению к нормали в точке встречи. Результат: отражение или преломление кванта определяется законом Брюстера, который применим к разделам фаз между конкретной жидкостью и воздухом, и наиболее изучен по отношению к воде. Для нахождения этого закона для аэрозолеобразующих составов (АОС) необходимо использовать поляризованный свет, направляя его на поверхность раздела фаз «воздух–АОС», изменяя угол падения с

¹ Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. Санкт-Петербург; 2000. 167 с.

одновременным поворотом направления поляризации относительно оси. В результате эксперимента необходимо получить критические значения угла падения поляризованного света и направления плоскости поляризации относительно плоскости АОС, когда наблюдается переход от преломления к отражению (и наоборот). Но можно использовать и эксперимент, который обеспечит измерение суммарного потока искаженного света с разными углами преломления и отражения. Для количественной экспериментальной оценки долей прямых и искаженных световых потоков поляризованного света после взаимодействия с аэрозолем предлагается использовать установку, которая включает элементы, показанные на рисунке 3 [7]:

обычный источник света (п. 1) с линзами (на рисунке 3 не показаны) для достижения изотропности пучка света;

- дифракционная решетка (п. 2), преобразующая обычный свет в поляризованный для облучения аэрозольной камеры (п. 3);

- светоприемник (п. 4), оснащенный подвижным окуляром с открытым сектором и углом α (кратным 360°), также оснащенный дифракционной решеткой, с направлением поляризации по центральному радиусу измерительного сектора (рисунк 4);

- фотоэлемент (п. 5) приемного устройства, соединенный с микроамперметром (6) для измерения фотопотока в люменах ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{ср})$).

При прохождении квантов через аэрозоль, часть из них (не задевшая частицы), сохранит вертикальную плоскость поляризации. Другая часть после неоднократного преломления и отражения изменит начальную плоскость поляризации.

Цель эксперимента – определение доли прямых и искаженных световых потоков на основе анализа их поляризации (сохранения или ее изменения), определяющих вероятности скрытия и искажения объекта (фона), после прохождения света через АК (аэрозольную камеру). Значение поляризованного светопотока после первой дифракционной решетки перед АК обозначим как I_0 (рисунк 3).

Подчеркнем, что вместо величины светового потока (люмены) можно использовать значения величину электротока (миллиамперы), если применяемый измерительный прибор проградуирован в относительных значениях света. Понятно, что при этом удобнее работать с прямо пропорциональной их зависимостью, что достижимо при не больших значениях светового потока.

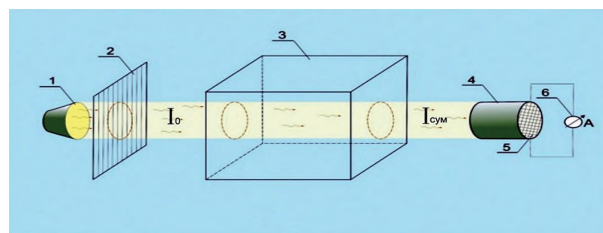


Рисунок 3 – Схема установки для экспериментального установления вероятности скрытия и искажения объектов прозрачными аэрозолями с использованием поляризованного света (рисунк авторов): 1 – источник обычного света; 2 – поляризатор (дифракционная решетка); 3 – аэрозольная камера; 4 – приемник света с поляризационной решеткой (два противоположащих сектора с углом α); 5 – фотоэлемент с микроамперметром (6)

Figure 3: Layout of facility that is aimed at finding out experimental probability for concealment and distortion of objects with transparent aerosols with polarized light (the figure is compiled by the authors of this paper): 1, a normal light source; 2, a polarizer (a diffraction grating); 3, an aerosol chamber; 4, a light receiver with a polarized grating (two opposite segments with α angle); 5, a photo cell with a microammeter (6)

Сущность эксперимента на предлагаемой установке заключается в том, чтобы осуществить замер светопотока при каждом изменении положения приемного сектора α при полном обороте (два пи), последовательно поворачивая приемный окуляр на шаг α , рисунок 4. При каждом повороте приемного устройства измеряется величина светопотока $I_i(\alpha)$. При этом необходимо зафиксировать результаты и выполнить математическую обработку измерений. Сущность математической обработки заключается в следующем:

каждому сектору с порядковым номером i соответствует сумма потоков света после АК, совпадающая с направленностью центрального радиуса данного сектора и вклада световых потоков, совпадающих по полярности с соседними секторами. При выбранной нами начальной вертикальной полярности света (от первой дифракционной решетки), световой поток, не задевший частицы аэрозоля, при первом измерении (сектором 1 и 7) проходит через второй поляризатор без уменьшения своей величины. Но кроме света, совпадающего по полярности с первым измерительным сектором, в него попадают световые потоки (взаимодействовавшие с частицами аэрозоля), совпадающие с направлением соседних секторов (по центральному их радиусу), при этом величина их вклада в общий измеренный световой поток сектора



Рисунок 4 – Схема поляризационного фотоприемного окна светового потока после аэрозольной камеры (рисунок авторов)

Figure 4: A layout of a polarized photo-receiving slot of a light flow after an aerosol chamber (the figure is compiled by the authors of this paper)

измерения определяется известным законом Малюса [6], рисунок 5. Эти рассуждения применимы и к другим секторам: i -ый сектор «принимает» без снижения величины свет, совпадающий с направлением собственной полярности, и снижает световые потоки, совпадающие по направлению соседних секторов по закону Малюса. Отметим, что аргументом для функции Малюса, в данном примере, является угол, кратный ($j \alpha$), где j – номер шага, отсчитываемый вправо-влево от угла измерения.

Обозначим нумерацию секторов следующим образом (при условии: α равно 30°). Первый измерительный сектор от -15° до $+15^\circ$. Далее по часовой стрелке: 2, 3 и т. д. по 12 включительно, рисунок 6.

При осуществлении измерений светового потока последовательно с первого сектора можно обозначить полученные результаты как: $I_1^{\text{изм}}, I_2^{\text{изм}}, I_3^{\text{изм}}, I_4^{\text{изм}}, I_{11}^{\text{изм}}, I_{12}^{\text{изм}}$.

При этом следует понимать, что светоприемный окуляр первого сектора «работает» или осуществляет измерения попарно с сектором № 7; 2 с 8; 3 с 9; 4 с 10; 12 с 6; 11 с 5, что в сумме составит 6 измерений. Составим систему из шести линейных уравнений (10), в которой учитывается эффект сложения световых потоков собственного направления и вклада пяти соседних направлений по формуле Малюса – $F_{(j \times 30)}$. Система включает шесть неизвестных: величина светового потока, соответствующая направленности центрального радиуса каждого i -го сектора – I_i (ист), рисунок 6. Отметим, что I_1 (ист) первого сектора соответствует лучам, не задевшим частицы аэрозоля, то есть прямому свету, значение которого позволяет определить вероятность скрытия по предложенной ранее зависимости:

$$\begin{aligned} I_1^{\text{изм}} &= I_1(\text{ист}) + I_2(\text{ист}) \times F(30) + I_3(\text{ист}) \times F(60) + I_4(\text{ист}) \times F(90) + I_{12}(\text{ист}) \times F(30) + I_{11}(\text{ист}) \times F(60) \\ I_2^{\text{изм}} &= I_2(\text{ист}) + I_3(\text{ист}) \times F(30) + I_4(\text{ист}) \times F(60) + I_{11}(\text{ист}) \times F(90) + I_{12}(\text{ист}) \times F(60) + I_1(\text{ист}) \times F(30) \\ I_{11}^{\text{изм}} &= I_{11}(\text{ист}) + I_{12}(\text{ист}) \times F(30) + I_1(\text{ист}) \times F(60) + I_2(\text{ист}) \times F(90) + I_4(\text{ист}) \times F(30) + I_3(\text{ист}) \times F(60), \end{aligned} \quad (10)$$

где: I_1 (ист) – I_{11} (ист) истинное значение светопотока, соответствующее данному сектору

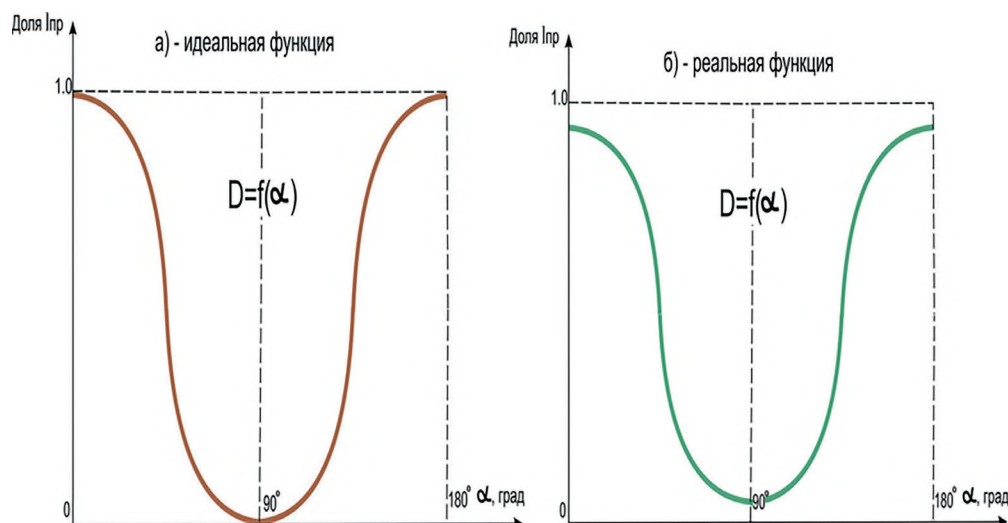


Рисунок 5 – Зависимость доли пропускания поляризованного света под разными углами α (функция Малюса, $\cos^2 \alpha$) (рисунок авторов)

Figure 5: The dependence of polarized light transmission value from angle α measures (Malus function, $\cos^2 \alpha$) (the figure is compiled by the authors of this paper)

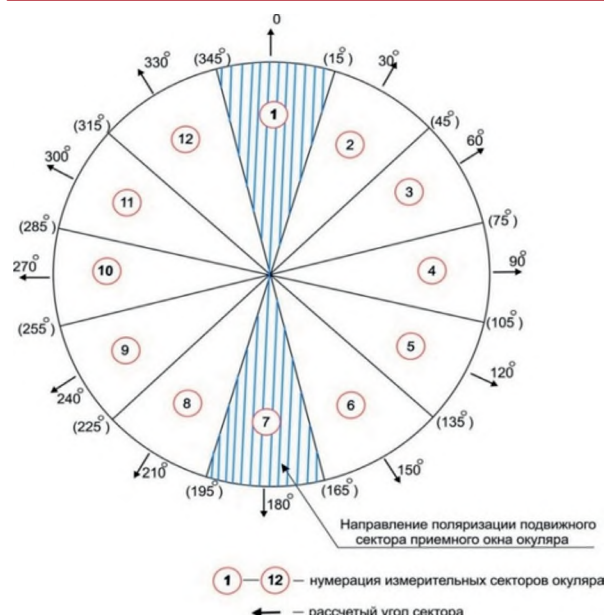


Рисунок 6 – Схема нумерации секторов при условии значения измерительного окна равного 30° для измерения световых потоков поляризованного света и последующей их математической обработки с целью определения параметров скрытия и искажения объекта (фона) аэрозолем (рисунок авторов)

Figure 6: Segment numeration pattern provided that measurement slot is 30° for polarized light flows measurements and their further mathematical processing in order to determine concealment and distortion parameters for objects and background when we use a masking aerosol (the figure is compiled by the authors of this paper)

(центральному радиусу сектора) поляризации, совпадающее с положением приемного сектора, а все остальные слагаемые составляют вклад лучей, совпадающих с направлениями всех соседних секторов поляризации в величину измеренного фотопотока данного сектора по зависимости Малюса;

$F_{(1)}-F_{(i)}$ – значение функции Малюса для учета вклада соседних секторов поляризации с шагом измерений 30° (кратность шага j отсчитывается вправо-влево от измеряемого сектора).

Полученная система шести линейных уравнений с шестью неизвестными имеет решение посредством последовательной замены неизвестных.

Полученная расчетным способом величина $I_{1 \text{ (ист)}}$ первого сектора соответствует прямым лучам, не изменившим начальную плоскость поляризации, то есть прошедших свободно через аэрозоль. Если источник света изотропный и по размеру соответствует площади приемного окуляра, то в силу его однородности общая величина света прямых лучей, прошедших через все сектора (соот-

ветствует 360°), должна быть кратной количеству измерений, то есть в рассматриваемом случае – шести:

$$I_{\text{пр}} = I_{1 \text{ (ист)}} \times 6. \quad (11)$$

Поскольку светопоток после аэрозольной камеры суммарно состоит из прямых и искаженных квантов ($I_{\text{сум}}$, рисунок 3), то измерив его величину после АК перед второй дифракционной решеткой ($I_{\text{сум}}$), можно получить значение искаженного потока:

$$I_{\text{и}} = I_{\text{сум}} - I_{\text{пр}}. \quad (12)$$

Полученные значения световых потоков по уравнениям (11), (12) позволяют определить вероятность скрытия, искажения и маскировки в целом по зависимостям, представленным ранее: (4)–(6).

Возможные погрешности

Следует понимать, что в результате многих отражений и преломлений существует вероятность того, что конечная плоскость поляризации кванта будет близка к исходной, то есть вертикальной, как принято нами. Понятно, что чем больше секторов, тем меньше погрешность. Но при этом растет количество уравнений и неизвестных. Можно высказать предположение, что в ходе прохождения света через аэрозольную камеру, вероятность изменения поляризации света вправо и влево от вертикали на угол α j , будет одинаковой. Это означает, что светоприемник удобнее делить на равное нечетное количество секторов в пределах 180° , в которых проводятся измерения. Тогда измерения по соседним симметричным секторам будут равными (в пределах погрешности измерений), что приведет к снижению почти вдвое количества неизвестных, и решение системы уравнений (10) упростится.

Предложение о первичной практической проверке параметров маскировки: скрытия и искажения

Для первичного подтверждения (или отрицания) предлагаемой теории основных параметров маскировки: скрытия и искажения, нет необходимости конструирования приемного устройства, предлагаемого выше. На первом этапе достаточно использование двух дифракционных решеток (ДР). Сущность их использования заключается в следующем:

1. Выполняется проверка коэффициента снижения светового потока каждой ДР и изотропности светового потока, использу-

емого для освещения АК. Для этого каждая из ДР (поочередно), устанавливается после источника света (без АК или при «пустом» АК без аэрозоля) и измеряется величина снижения светового потока за счет ДР по отношению к свету без ДР. Этот показатель для идеальной ДР должен быть равным двум, реальная решетка может иметь несколько большее значение. При повороте одной решетки на любой угол эта величина не должна существенно меняться (в пределах погрешности измерений), что подтвердит изотропность источника света.

2. Оценка взаимодействия двух решеток. Фиксируется первая ДР (после источника света) в стабильном положении, например, в вертикальном. Осуществляется проверка пропускания света второй решеткой после первой (без аэрозоля) при параллельном их положении и перпендикулярном. В первом случае величина светового потока должна остаться практически прежней (с небольшим уменьшением), во втором, снизиться почти до нуля. Реальные цифры будут несколько отличаться, например, эти показатели будут равными $X_{\text{пар}} = 0,95$ и $X_{\text{пер}} = 0,05$. Зафиксировать полученные показатели. Отношение световых потоков $X_{\text{пар}}/X_{\text{пер}}$ (0,95/0,05), равное 19, – опорное.

Примечание: наличие АК даже без аэрозоля окажет влияние на некоторое изменение полярности начального светового потока за счет его взаимодействия со стеклом АК. На выходе из АК направление полярности изменится на малый угол «бета». Эту величину, зависящую от толщины прозрачных стенок АК можно определить приемной решеткой, которая даст максимальное снижение величины светового потока не при 90° относительно исходного направления поляризации, а при 90° плюс «бета».

3. Проверка изменения доли прямого света и искаженного при ступенчатом повышении концентрации аэрозоля в АК. В соответствии с предлагаемой теорией при возрастании концентрации аэрозоля (соответственно и интегральной концентрации) в АК, при проведении измерений величины света приемным устройством, должна снижаться доля прямого света (за счет скрывания пространства) и возрастать доля искаженного при одновременном снижении величины светового потока в целом при каждом измерении.

Порядок измерений

3.1. Для иллюстративности теории необходимо отрегулировать порядок скачкообразного повышения концентраций аэрозоля. При наличии трехгранной камеры, представленной в патенте [2], наверное, будет доста-

точно 3 «скачков» или уровней плотности потока от 0,3 до 3 г/м²: 0,3; 1,0; 3,0 г/м².

3.2. На каждом уровне провести измерения при удвоении длины аэрозоля в камере по линии визирования. На каждом уровне концентраций вначале замеряется величина света фотометром на короткой трассе при параллельном положении ДР, а потом – при перпендикулярном. Аналогично на удвоенной длине трассы. Необходимо при каждом положении ДР увеличивать исходную величину света (лучше вдвое) посредством, например, реостата в сети подачи тока на источник света. Изменение величины светового потока не должно оказывать влияния на соотношение долей измеряемого света при параллельном и перпендикулярном положении ДР в пределах погрешности измерений. Например, первый замер показал величину света при параллельном положении ДР – 0,05 А, при перпендикулярном – 0,01 А. Увеличение светового потока вдвое (за счет реостата) должно обусловить примерное удвоение этих показателей. Это будет означать, что начальная величина освещенности АК не оказывает влияние на соотношение долей прямого и искаженного света, то есть на маскировку при неизменности всех других исходных условий.

3.3. Динамика изменения величины светового потока. В соответствии с теорией, при скачкообразном возрастании концентраций в АК должно изменяться соотношение световых потоков (прямых и искаженных). Отношение величины электрических токов (отражающих величину света) при параллельном и перпендикулярном положении решеток при постепенном увеличении концентрации аэрозоля ($X_{\text{пар}}/X_{\text{пер}}$) должно снижаться. В пределе при высоких значениях плотности потока это отношение будет приближаться к единице. Это будет означать, что почти весь поляризованный свет за счет преломления и отражения на частицах аэрозоля изменил свою полярность практически равномерно «по кругу», и достигнуто полное скрывание пространства. С этого момента повышение плотности потока может приводить к снижению яркости аэрозоля (вместо прежнего роста), но качество маскировки не изменится (достигнут предел). Повышение освещенности АК не должно менять это отношение.

Самый простой способ проверки наличия прямых и искаженных лучей без АК

Взять полупрозрачное молочное стекло, источник света и две ДР. Молочное стекло – вместо АК. При этом при визуальной про-

верке через это стекло не должна просматриваться картина при обычной освещенности.

При отсутствии стекла поворот приемной ДР на 90° даст максимальное снижение фототока (кратность). Если установить между ДР молочное стекло, то поворот приемной ДР не должен менять кратность снижения фототока (показания микроамперметра). Это значит, что прямых лучей нет, все лучи искажены и распределены равномерно по кругу. Увеличение освещенности (силы света) ничего не изменит, отношение величины токов светоприемника при полной маскировке не должно меняться в пределах погрешности измерений.

Выводы

1. В качестве основных параметров маскировки объектов аэрозолями необходимо использовать величину доли скрытия пространства частицами аэрозоля для наблюдателя (оптического прибора) и долю искаженного светового потока, кванты которого после встречи с прозрачными частицами поменяли первоначальное направление распространения от объекта и проецируются на

другие, а не исходные точки наблюдаемого объекта и фона. Сумма этих вероятностных независимых событий и является итоговой величиной вероятности маскировки.

2. Для экспериментального установления вероятности скрытия и искажения объектов прозрачными аэрозолями может быть использована экспериментальная установка на основе традиционной аэрозольной камеры и двух дифракционных решеток: первая для получения начального источника плоско поляризованного света, вторая – в качестве приемного устройства в виде подвижных противолежащих секторов, предназначенная для измерения величины света при каждом дискретном повороте в пределах полного поворота измерительного устройства на 360 градусов.

3. Разработан математический аппарат обработки результатов измерений, для получения параметров маскировки, исходя из доли скрытия пространства аэрозолем и искажения наблюдаемой (регистрируемой) картины прозрачным аэрозолем вследствие изменения первоначального направления доли светового потока от объекта и фона.

Ограничения исследования / Limitations of the study

Обусловлены исходными данными: дисперсность частиц аэрозоля 1–10 мкм, плотность потока (интегральная концентрация) – 0,1–10 г/м², видимый диапазон ЭМИ спектра облучения аэрозольной камеры. / The limitations of the study are stipulated by the raw data: dispersion of aerosol particles 1–10 μm, flow density (integral concentration) – 0,1–10 g/m², visible range of electromagnetic impulse radiation spectrum of aerosol chamber.

Список источников / References

1. Вейцер ЮИ, Лучинский ГП. *Маскирующие дымы*. М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы; 1947. 208 с.
Weitzer YuI, Luchinsky GP. *Disguising Fumes*. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature; 1947. 208 p. (in Russian).
2. Засидателев ВБ, Козлов СА, Болотов АВ, Решетник АС, Тучин НА, Болсуновский СВ. Способ определения маскирующих характеристик аэрозолей. Патент RU 2 376 583 C2 от 20.12.2009 г.
Zaitsev VB, Kozlov SA, Bolotov AV, Reshetnikov AS, Tuchin NA, Bolsunovsky SV. A method for determining the masking characteristics of aerosols. The Patent RU 2 376 583 C2. 20.12.2009 (in Russian).
3. Колесников ДП, Пенязь ВН, Голышев МА, Буряк ДН, Артамонов ИВ. Влияние дисперсности аэрозоля на его маскирующую способность. *Вестник войск РХБ защиты*. 2021;5(3):260–8.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
Kolesnikov DP, Penyaz VN, Golyshev MA, Buryak DN, Artamonov IV. Effect of Aerosol Dispersion on Its Masking Ability. *Journal of NBC Protection Corps*. 2021;5(3):260–8 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
4. Брусенин АА, Красильников СА, Пенязь ВН, Буряк ДН, Артамонов ИВ, Бурков ВД. Аналитическая зависимость вероятности маскировки объектов от плотности и дисперсности аэрозоля. *Вестник войск РХБ защиты*. 2023;7(1):53–61.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>
Brusenin AA, Krasilnikov SA, Penyaz VN, Buryak DN, Artamonov IV, Burkov VD. Analytical Dependence of the Probability of Masking Objects on the Density and Dispersion of the Aerosol. *Journal of NBC Protection Corps*. 2023;7(1):53–61 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>

5. Брусенин АА, Бурак ДН, Пенязь ВН, Артамонов ИВ. Оценка структуры свободного пространства в аэрозольном облаке. *Вестник войск РХБ защиты*. 2024;8(2):176–84.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2024-8-2-176-184>

Brusenin AA, Buryak DN, Penyaz VN, Artamonov IV. Estimation of the Structure of Free Space in an Aerosol Cloud. *Journal of NBC Protection Corps*. 2024;8(2):176–84 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2024-8-2-176-184>

6. Брусенин АА, Голышев МА, Пенязь ВН, Бурак ДН, Артамонов ИВ, Полякова ГЮ. Способ количественной оценки маскирующей способности аэрозоля и установка для его осуществления. Патент № 2814453 от 26.02.2024 г.

Brusentsov AA, Golyshev MA, Prince VN, Buryak DN, Artamonov IV, Polyakova GYu. A Method for Quantifying the Masking Ability of an Aerosol and an Installation for its Implementation. The Patent № 2814453. 26.02.2024 (in Russian).

7. Вейцер ЮИ, Лучинский ГП. *Химия и физика маскирующих дымов*. Ленинград: Государственное издательство обороной промышленности; 1938. 203 с.

Weitzer YI, Luchinsky GP. *Chemistry and Physics of Masking Fumes*. The State Leningrad: Publishing House of the Defense Industry; 1938. 203 p. (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contributions

А.А. Брусенин – редактирование статьи. **В.Н. Пенязь** – постановка задачи, написание начального варианта статьи. **Д.Н. Бурак** – поиск научной литературы и работа с первоисточниками. **И.В. Артамонов** – разработка иллюстративного материала, оформление статьи в соответствии с редакционными требованиями. **Д.С. Горбачев** – математическая модель обработки результатов эксперимента. / **A.A. Brusenin** has edited the article. **V.N. Penjaz'** has formulated the concept of the study, has written the initial draft of the article. **D.N. Buryak** has searched for academic sources, has analyzed the material. **I.V. Artamonov** has made illustrations, has complied with the requirements to the article. **D.S. Gorbachev** has created a mathematical pattern for experiment results processing.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации, 111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.

Брусенин Альберт Александрович. Начальник научно-исследовательского отдела, канд. техн. наук.

Пенязь Владимир Николаевич. Старший научный сотрудник отдела, канд. техн. наук, почетный работник науки и техники РФ.

Бурак Дмитрий Николаевич. Научный сотрудник отдела.

Артамонов Илья Валерьевич. Научный сотрудник отдела.

Горбачев Дмитрий Сергеевич. Научный сотрудник отдела.

Контактная информация для всех авторов: 27nc_l2@mil.ru

Контактное лицо: Брусенин Альберт Александрович; 27nc_l2@mil.ru

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Albert A. Brusenin. Head of the Research Department, Cand. Sci. (Techn.).

Vladimir N. Penjaz'. Senior Researcher of the Department, Cand. Sci. (Techn.), Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation.

Dmitry N. Buryak. Research associate of the department.

Ilya V. Artamonov. Research associate of the department.

Dmitry S. Gorbachev. Research associate of the department.

Contact information for all authors: 27nc_l2@mil.ru

Contact person: Albert A. Brusenin; 27nc_l2@mil.ru